

# $^{87}\text{Rb}$ 原子の D1 遷移用小型外部共振器レーザーの製作

III類 物理工学プログラム 岸本研究室

学籍番号・氏名 1710384・竹内和斗

## 1. 研究の目的

本研究室では  $^{87}\text{Rb}$  原子によるボース・アインシュタイン凝縮を連続的に生成することが目的である。ボース・アインシュタイン凝縮体を生成するためには原子を極低温まで冷却、また原子の高密度化をする必要があり、そのためには、波長を安定化した狭線幅レーザー光源が不可欠である。本研究では特に  $^{87}\text{Rb}$  原子の  $5S_{1/2}$ - $5P_{1/2}$  遷移(D1 遷移)に対する波長のレーザー光源の製作を目的に設定した。

$^{87}\text{Rb}$  原子の D1 遷移の波長は 795nm であり、 $^{87}\text{Rb}$  原子の冷却過程におけるポンピング光として D1 遷移を用いる。この波長の光源を用いることにより、ドップラー冷却より低い温度まで冷却可能な Gray Molasses 冷却が可能になる[1][2]。

また、光学系の小型・可搬化にむけて、外部共振器型半導体レーザー自体をこれまで研究室で使用していた設計より小型化することも目標とした。

## 2. 外部共振器レーザーの構成

今回製作する外部共振器レーザーは図 1 のように構成していて、半導体レーザー、コリメーションレンズ、干渉フィルタ、部分反射ミラー、PZT 素子で共振器を構成している。この外部共振器は半導体レーザーから出た光がコリメーションレンズによって平行光になり、干渉フィルタを通過する。干渉フィルタの角度を調整することによってフィルタを透過する光の波長を選択して、部分反射ミラーにより一部の光を反射させ、PZT 素子の電圧を加えると素子が伸び縮みするという特性により共振器長を調整するような構成になっている。このような構成にすることで、スペクトル線幅が狭い光を放射させることができる。

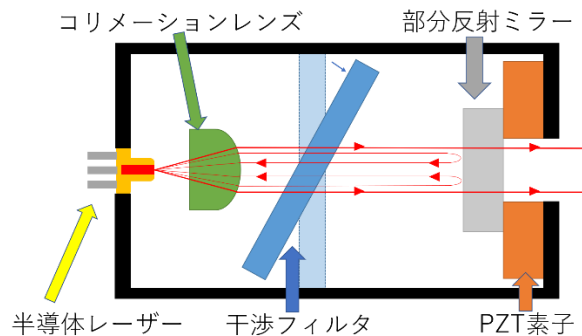


図 1 外部共振器レーザーの構成

## 3. 飽和吸収分光法

飽和吸収分光法は、図 2 の左の図のように光源からの光を、光強度の強い光 Pump 光と弱い光 Probe 光を Rb 原子が入ったガラスセルに対向するように入射させる。また、原子に

吸収されなかった Probe 光が光検出器に入射するように光検出器(PD)を設置する。ここで、図 2 の右の図のようにある速度  $v$  の原子に両方向から同じ周波数の光を入射させると原子が感じる周波数が異なるため、二つの光は異なる速度の原子を励起させる。入射光の周波数が共鳴周波数のときは 2 つの光に対して速度が 0 の原子を励起させる。

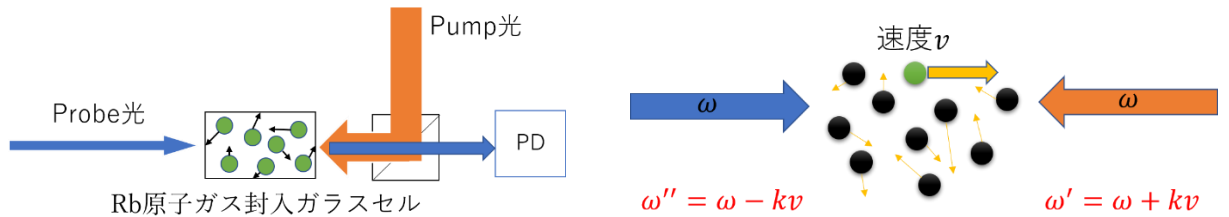


図 2 飽和吸収分光法イメージ図

図 3 は光検出器に入射する吸収されなかった Probe 光の光強度の変化である。Pump 光と Probe 光の周波数を少しずつ共鳴周波数に近づけていくと、原子が光を吸収するため光強度は減少していき、Probe 光と Pump 光の周波数が共鳴周波数付近になると、Probe 光と Pump 光 2 つのレーザーにより励起される原子はレーザーに対しての速度 0 付近なので、Probe 光により吸収される原子の数が減るため共鳴周波数付近になると吸収されなかった Probe 光の光強度が増加する。この光強度の増加している点をラムディップといい、波長を安定化するための基準になる。

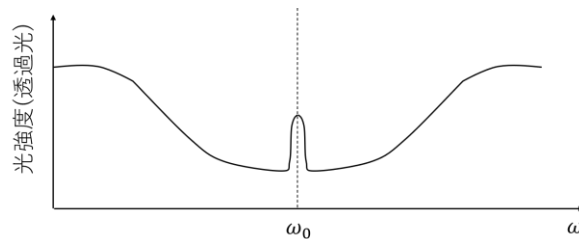


図 3 飽和吸収分光法 ラムディップ

#### 4. Modulation transfer 分光法

飽和吸収分光法により得られる信号をミキサーにより復調するとドップラー広がり起因するオフセットが乗ってしまうため、オフセットが乗らない Modulation transfer 分光法を用いる。Modulation transfer 分光法は飽和吸収分光法と同様に、Pump 光、Probe 光を入射させ、光検出器を設置する。また、電気光学位相変調器(EOM)を用いて Pump 光側に周波数  $\omega \pm \omega_m$  のサイドバンドを立てる。ここで、原子の運動量保存則について考えると、

Pump 光と Probe 光の吸収と周波数  $\omega \pm \omega_m$  のサイドバンドによる誘導放出について運動量変化は

$$\frac{\hbar\omega_{Pump}}{c} - \frac{\hbar\omega_{Probe}}{c} - \frac{\hbar(\omega \pm \omega_m)}{c} = -\frac{\hbar(\omega \pm \omega_m)}{c} \quad (1)$$

となる。よって、図 4 のように、原子は Probe 光と同じ向きに周波数  $\omega \pm \omega_m$  の光を放出する。

この手法により得られる信号をミキサーにより復調すると、共鳴周波数を境に正負が変わる信号になり、この信号をエラー信号としてサーボ回路に用いることにより PZT 素子、光源の電流コントローラーにフィードバックを与える。PZT 素子により共振器長を変化させて共鳴周波数でロックすることができ、波長を安定化させることができる。

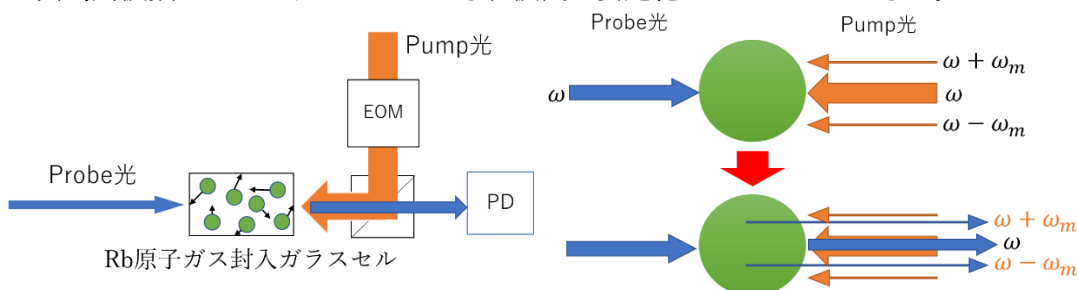


図4 Modulation transfer 分光法イメージ図

### 5. 外部共振器レーザーの波長安定化

製作した外部共振器レーザーを共振させるために部分反射ミラーの角度、距離を調整し、レーザーの出力を測定しながら発振させた。そして、光スペクトラムアナライザを用いてレーザーのピークが今回用いたい D1 遷移の波長 794.979nm になるように、干渉フィルタの角度を回して波長を調整した。Rb 原子が封入されたガラスセルにレーザーを照射し、IR カメラを用いて原子が蛍光していたことを確認し、波長の調整が適切に行うことができたのかを確認した。

実際に、飽和吸収分光法を組み、光検出器によって得られる吸収信号をオシロスコープにより観測した。観測した結果を図5に示す。この信号は光検出器に入射する光強度が減少すると電圧値が下がり、光強度が増加すると電圧値も増加する。図5より、入射光が減少していき、あるときに強度が増加しているラムディップという現象を観測することができた。よって、吸収信号が得られることを確認することができた。

$^{87}\text{Rb}$   $F=1 \rightarrow F'=1$  と  $^{87}\text{Rb}$   $F=1 \rightarrow F'=2$  の間は 814.5MHz であることを考慮すると、モードホップフリーレンジは 2.68GHz であった。

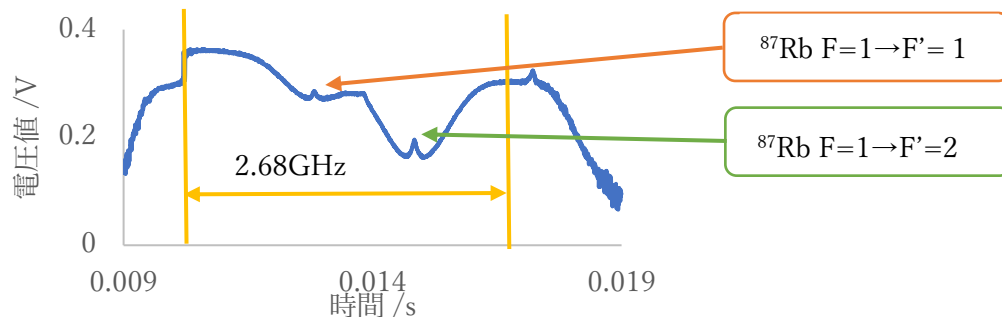


図5 吸収信号

次に、EOM を用いてプローブ光にサイドバンドをたて、Modulation transfer 分光法を用いた。ここでは、 $^{87}\text{Rb}$   $F=1 \rightarrow F'=2$  遷移近傍で得られたエラー信号を図6に示す。

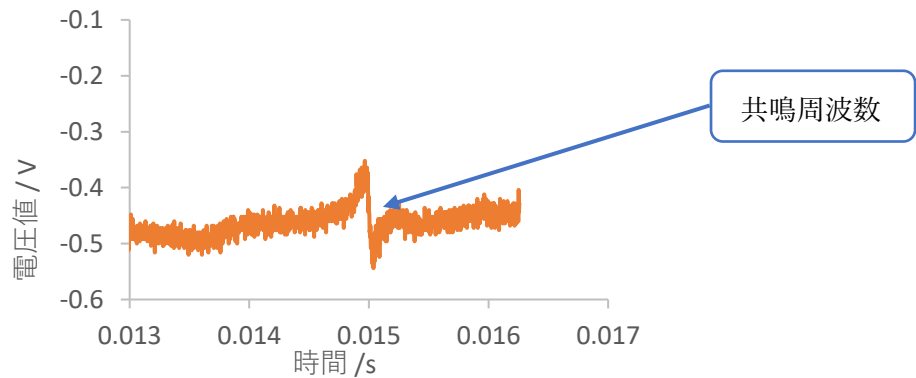


図6 得られたエラー信号

エラー信号にはノイズが乗っていたため、図6はオシロスコープの平均化の機能を用いた。図6より、共鳴周波数付近で電圧値が増加し減少している。しかし、オフセットが乗っているため共鳴周波数を境に正負が変わる信号を得ることができなかった。

今回はノイズとオフセットが乗っていたためこの信号を用いて波長を安定化することができなかった。

## 6. まとめと今後の展望

本研究では波長を安定化した狭線幅レーザー光源を目指すために外部共振器レーザーの製作に取り掛かった。製作した外部共振器レーザーの各光学素子の調整をし、吸収信号を確認した。しかし、エラー信号にノイズとオフセットが乗っているのを確認した。これによって波長安定化を行えないことがわかった。

今後の展望は、エラー信号のノイズの原因を探る。現在考えているノイズの原因は自作している光検出器とサーボ回路である。なので、光検出器を作成し直しノイズが削減する。また、サーボ回路のノイズの原因を探し改善すると共に、信号のオフセット調整を可能にする回路の追加を行う予定である。最終的にノイズが削減されたエラー信号を用いて波長安定化を実行していきたいと思っている。また、将来的には、PZTへ送るフィードバック信号の一部を利用して、電流に信号を加えることで、モードホップフリーレンジのさらなる拡張を図りたい。

## 7. 参考文献

- [1] 渡邊雅生  $^{87}\text{Rb}$  原子の D1 遷移を用いた Gray Molasses 冷却のための光源開発  
電気通信大学 卒業論文 平成 29 年度
- [2] Phys. Rev. A 93, 023421 (2016)
- [3] 久我隆弘著 朝倉書店 量子光学
- [4] Cunyun Ye Tunable External Cavity Diode Lasers
- [5] Christopher J .Foot Atomic Physics